بررسی اثر تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری بر رفتار دیوار برشی فولادی*

مجید قلهکی[۱]   فرزان خالدی[۲]   هادی معین[۳]

چکیده *دیوار برشی فولادی یک سیستم باربر جانبی نوین است که در آن ورق فولادی طی فرآیند جوشکاری سنگین توسط تسمه‌های واسط به قاب پیرامونی متصل می‌شود. معمولاً برای اتصال ورق¬های فولادی به قاب پیرامونی از جوش ذوبی استفاده می‌شود. این جوشکاری به‌دلیل افزایش موضعی دما تا حد دمای ذوب در محل اتصال و سپس سرد شدن سریع محل اتصال و توزیع نامتقارن دما و کرنش-های پلاستیک، باعث ایجاد تنش‌های پسماند در فلز جوش و فلز پایه می‌شود. این مسئله می‌تواند بر رفتار مکانیکی ورق و قاب پیرامونی تأثیرگذار باشد. در این مقاله جوشکاری ورق به اعضای محیطی به‌صورت دو بعدی و کوپل غیرمستقیم حرارتی- مکانیکی از طریق کدنویسی در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده و فلاکس حرارتی به‌صورت سطحی و دایره‌ای شکل اعمال شده است. اعمال فرآیند جوشکاری و مدل-سازی تنش‌های پسماند در ورق¬های دیوار برشی فولادی سه طبقه دارای اتصال گیردار نشان می‌دهد که میزان سختی، بار تسلیم، بار نهایی، شکل‌پذیری و جذب انرژی در مدل دارای تنش پسماند نسبت به مدل بدون تنش پسماند به‌ترتیب ۷٫۱٪، ۱٫۳٪، ۱٫۲٪، ۷٫۱٪ و ۳٫۱٪ کاهش یافته است.*

واژگان کلیدی دیوار برشی فولادی؛ جوشکاری؛ تنش پسماند.

Effect of Welding Residual Stresses on Performance of Steel Plate Shear Wall

M.Gholhaki   F.khaledi   H.Moein

Abstract *The effect of Welding residual stresses that was created in thin infill plate of steel plate shear wall system during constructional processes was studied in this research. Residual stresses in a welded structure is the result of the non-uniform expansion and contraction and plastic deformation of the weld and surrounding base metal due to heating and cooling cycle, during welding process, this issue could affected SPSW`s behavior. In this research ABAQUS finite element software is utilized to simulation of welding process and steel plate shear wall behavior. Sequentially coupled thermo-elastic–plastic finite element computational procedure is developed to calculate temperature field and welding residual stresses in SPSW. The result shows that residual stresses created in infill plates of three story steel plate shear wall with rigid beam-column connection due to welding process makes yielding load, ultimate load, stiffness, ductility and energy absorption, decrease 1.4%, 1.26%, 7.6%, 7.3%, 3.4% respectively in model with residual stresses in comparison with model without residual stresses. Thus, the ignore of residual stresses effect due to welding in prospect of thin steel plate shear walls(SPSWs) behavior is negligible.*

Keywords Steel plate shear wall; Welding residual stresses; welding processes.

*تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۱۱/۱۵ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۹/۲۶ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: دانشیار دانشکدهٔ مهندسی عمران ، دانشگاه سمنان.

(۲)کارشناس ارشد دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

(۳) دانشجوی دکتری مکانیک، دانشکدهٔ علوم مهندسی، دانشگاه سایمون فریزر برنابی، بریتیش کلمبیا، کانادا.

مقدمه

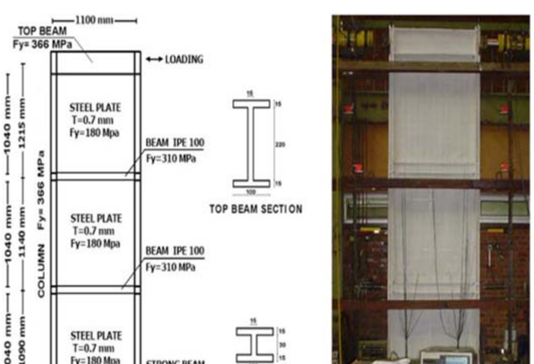
استفاده از سیستم دیوار برشی فولادی به‌عنوان یک سیستم باربر جانبی با توجه به مزایای فراوانی که دارد در چند دهۀ اخیر مورد توجه طراحان و محققان قرار گرفته است. در این سیستم که به دو نوع با و بدون سخت‌کننده تقسیم می‌گردد، ورق‌های پرکننده طی فرآیند جوشکاری سنگینی به تیرها و ستون‌های پیرامونی متصل می‌شوند و چنانچه عملیات جوشکاری با تمهیدات ویژه‌ای انجام نشود، تنش‌های پسماند می-تواند بر روی رفتار سیستم تأثیرگذار باشد. تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری به علت اعمال حرارت موضعی، سرد شدن سریع ناحیۀ جوش شده، انقباض و انبساط‌های ناهمگن و کرنش‌های پلاستیک ایجاد شده در فلز جوش شده ایجاد شده و در بعضی مواقع تا حد تنش تسلیم افزایش می‌یابند. تنش‌های پسماند ایجاد شده در سازۀ جوش شده می‌تواند باعث افت عملکرد سازه شود و بنابراین آگاهی از مقدار و نحوۀ توزیع تنش‌های پسماند ضروری است.

صبوری و رابرتز به مطالعه و بررسی ۱۲ پانل برشی کوچک مقیاس با ورق نازک تحت بارگذاری چرخه‌ای پرداختند. یکی از نتایج خوب این آزمایش‌ها بررسی اثر بازشوها بر سختی و مقاومت دیوار بود[1]. کاسس و الغالی سه نمونه دیوار برشی با مقیاس ۱/۳ را مورد آزمایش قرار دادند که در یکی از نمونه‌ها از اتصال جوشی و در دو نمونۀ دیگر از اتصال پیچی استفاده کردند و نمونه‌ها تحت بارگذاری قرار داده شد، نتایج آزمایش نشان داد که به‌دلیل لغزش و جاری شدگی در پیچ‌ها، سختی دیوار با اتصال پیچی کمتر از سختی دیوار با اتصال جوشی است و جاری‌شدگی در ورق در حالت اتصال با پیچ در بار کمتری نسبت به اتصال جوشی رخ می‌دهد[2]. صبوری و قلهکی در سال(۲۰۰۷) دو نمونه دیوار برشی فولادی یک دهانۀ سه طبقۀ بدون سخت‌کننده را تحت آزمایش قرار داد. یکی از نمونه ها دارای اتصال ساده و دیگری دارای اتصال گیردار بود. هدف از انجام آزمایش‌ها بررسی اثر اتصال ساده و گیردار و بررسی عملکرد دیوار برشی فولادی با استفاده از فولاد نرم در ورق دیوار بود. آزمایش‌ها نشان داد که شکل‌پذیری و توانایی جذب انرژی بالا در دیوارهای برشی فولادی وجود دارد و نوع اتصال اثر زیادی بر روی سختی سیستم ندارد[۳].

اگرچه در بسیاری از نمونه‌های دیوار برشی فولادی ساخته شده، از اتصال جوشی استفاده شده است اما علی‌رغم نازک بودن ورق و وجود تنش¬های پسماند ناشی از جوشکاری سنگین، توجه ویژه ای به این مسئله نشده است. در طول ٤۰ سال گذشته، تلاش-های زیادی برای استفاده از روش‌های تحلیلی پیشرفته در تحلیل فرآیند جوشکاری صورت گرفته است، نتایج تحقیقات نشان می دهد با توجه به پیچیدگی‌های فراوان در فرآیند جوشکاری، آنالیزهای ریاضیاتی ساده برای این فرآیند پیچیده مناسب نیست. همچنین با انجام تست‌های آزمایشگاهی، به‌دست آوردن الگوی کاملی از توزیع تنش¬های پسماند در کل سازۀ جوشکاری شده امکان‌پذیر است و مقدار تنش¬ها تنها به‌صورت موضعی به‌دست می آید[4]. از این رو مدل‌سازی کامپیوتری و تحلیل عددی برای بررسی صحیح این فرآیند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار گشته است و راه را برای تحلیل‌های دقیق‌تر هموار می‌کند. در این میان، روش اجزای محدود روش بسیار مناسبی برای شبیه-سازی فرآیند جوشکاری و پیش‌بینی توزیع دما، تنش-های پسماند و سایرخروجی های فرآیند جوشکاری می‌باشد. یاجیانگ و جوان (٢٠٠٤) تنش‌های پسماند ایجاد شده در جوشکاری فولادهای استحکام بالا را با استفاده از روش اجزای محدود به دست آوردند. در این تحقیق از یک مدل دوبعدی کرنش صفحه‌ای برای مدل-سازی جوش سر به سر دو ورق استفاده شد. هم‌چنین به‌دلیل تقارن دو مدل تنها نصف اتصال مدل شده است.

بارگذاری در این مدل به‌صورت توزیع مثلثی (ذوزنقه‌ای) و به‌طور یکنواخت روی گره‌های منطقهٔ جوش اعمال شده است. روش مورد استفاده در این تحقیق تحلیل همبند غیرمستقیم حرارتی-مکانیکی است[5]. چنگ و تنگ(۲۰۰٤) در تحقیقی مشترک تنش‌های پسماند ایجاد شده در جوشکاری سر به سر یک پاسه دو ورق را با استفاده از تکنیک اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند. نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق دو ورق بلند با طول ۳۰۰ میلی‌متر، به عرض ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت‌های ۵، ۸ و ۱۲ میلی‌متر بود. برای مدل‌سازی اجزای محدود آن‌ها از یک مدل دو-بعدی متقارن و روش همبند غیرمستقیم استفاده گردید. هم‌چنین خواص مورد استفاده در آنالیزها وابسته به دما فرض شد. آنها با انجام این تحلیل نشان دادند که تنش-های طولی با بزرگی برابر با تنش تسلیم فلز پایه و به-صورت کششی در نواحی نزدیک خط جوش به‌وجود آمده و با فاصله گرفتن از مرکز خط جوش، این تنش‌ها به تنش فشاری تبدیل می‌شود[6]. سینگلاکیس و ملور(۱۹۹۹) از یک مدل دو بعدی متقارن برای مدل-سازی جوشکاری سر به سر صفحات در روش اجزای محدود استفاده کردند. آنها برای مدل کردن منبع جوش در تحلیل از تابع پله‌ای تغییرات دمایی استفاده کردند. مرحلهٔ اول شامل افزایش خطی حرارت تا مقدار q (دمای قوس) تا زمان t_1 ، مرحلهٔ دوم ثابت نگه داشتن تا زمان t_2 و در مرحلهٔ سوم کاهش خطی حرارت تا زمان t_3 بوده و مرحله چهارم شامل خنک شدن تا دمای محیط بود. تحلیل اجزای محدود به‌صورت همبند غیر-مستقیم صورت گرفت و نتایج به‌دست آمده هم‌خوانی خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت[7]. دنگ و موراکاوا (۲۰۰۸) به مطالعه و بررسی اجزای محدود، تنش¬های پسماند ناشی از جوشکاری لب به لب ورق¬های فولادی نازک پرداختند. مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و به‌صورت همبند غیرمستقیم حرارتی-مکانیکی صورت پذیرفت. در اطراف خط جوش از مش‌های با ابعاد کوچک‌تر استفاده شد و با فاصله گرفتن از خط جوش از مش‌های با ابعاد بزرگتر استفاده گردیده. منبع حرارتی و نحوهٔ توزیع حرارت براساس مدل بیضی دوگانهٔ گلداک در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که تغییرات حرارتی در ضخامت ناچیز است و تنش¬های پسماند در حوالی خط جوش به‌صورت کششی و در نواحی دورتر به‌صورت فشاری است [۸].

به‌منظور بررسی تنش¬های پسماند بر رفتار دیوار برشی فولادی، مدل آزمایشگاهی مطابق شکل(۱) [۳]، یکبار بدون در نظر گرفتن تنش¬های پسماند و یک بار با در نظر گرفتن تنش¬های پسماند مدل‌سازی شد و تحت بارگذاری مطابق دستورالعمل ATC-24 [9] قرار گرفت. مدل آزمایشگاهی یک نمونه با مقیاس ۱/۳ و دارای اتصال تیر به ستون گیردار بود که توسط قلهکی مورد آزمایش قرار گرفت. در این نمونه ورق¬ها از نوع فولاد نرم، ستون‌ها از فولاد پرمقاومت و تیرهای میانی از نوع فولاد ساختمانی انتخاب شد که مشخصات مکانیکی آنها درجدول(۱) آمده است. مدول الاستیسیتهٔ تمامی فولادها ۲۰٦ گیگاپاسگال و ضریب پواسون آنها ۰/۳ در نظر گرفته شده است[۱۰].



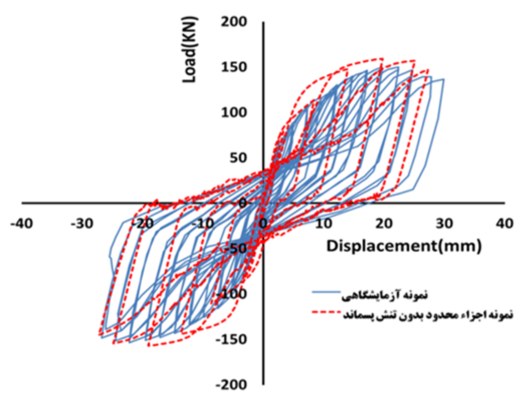
شکل ۱ نمونه آزمایشگاهی سه طبقه دیوار برشی فولادی

جدول ۱ مشخصات مکانیکی مصالح مصرفی در دیوار برشی فولادی

فولاد مصرفی	ضخامت (میلی متر)	تنش تسلیم (میلی متر)	تنش نهایی (میلی متر)
ورق پرکننده	۰/۰۷	۱۸۰	۳۰۱
ستون و تیر فوقانی	۱۵	۳٦٦	٥٤۹
بال تیر میانی	٥/۷	۳۰۹	٤٤۳
جان تیر میانی	٤/۱	۳۱۰	٤٤۹

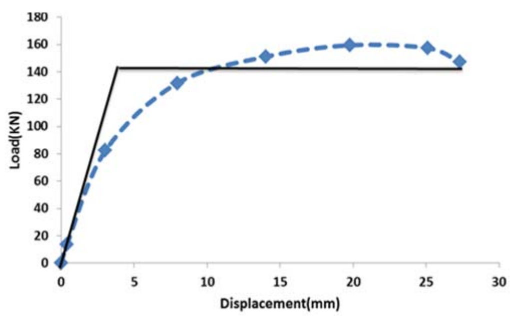
آنالیز مکانیکی مدل بدون اعمال تنش‌های پسماند

در مدل‌سازی نمونه در نرم‌افزار آباکوس از المان‌های شل استفاده شد و به‌منظور شروع عملکرد میدان کشش قطری، یک تغییر مکان اولیه به میزان ۲ میلی‌متر در وسط هریک از ورق‌ها اعمال گردید. بارگذاری جانبی مطابق شرایط آزمایشگاهی در بالای نمونه و با کنترل تغییرمکان صورت پذیرفت. در اولین مرحلهٔ مدل‌سازی، دیوار برشی فولادی سه‌طبقه بدون وجود تنش پسماند تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفت و نمودار بار- تغییرمکان تحت بارگذاری چرخه‌ای آن با نتایج نمونهٔ آزمایشگاهی مطابق شکل (۲)، مقایسه گردید.



شکل ۲ مقایسهٔ رفتار چرخه ای طبقه اول مدل آزمایشگاهی و اجزای محدود بدون در نظر گرفتن تنش‌های پسماند

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نتایج از تطابق مناسبی برخوردار می‌باشند. به‌منظور بررسی میزان سختی، مقاومت تسلیم، مقاومت نهایی، شکل‌پذیری و جذب انرژی مدل اجزای محدود، نمودار پوش منحنی چرخه‌ای مدل ترسیم شد و بر روی آن، مدل دوخطی ایده‌آل بار-تغییرمکان مطابق شکل(۳) ترسیم گردید. بر این اساس، پارامترهای رفتاری دیوار برشی فولادی مذکور مطابق جدول (۲) محاسبه گردید.



شکل ۳ نمودار پوش و منحنی دوخطی بار- تغییرمکان نمونه بدون تنش پسماند

جدول ۲ پارامترهای رفتاری نمونه اجزای محدود بدون تنش پسماند

پارامتر	مقدار
سختی	۳٤ KN/m
مقاومت تسلیم	۱٤۳ KN
مقاومت نهایی	۱٥۸ KN
شکل پذیری	٦/٥٥
جذب انرژی	۱۸/٦۹ KN/m

مدل‌سازی نمونه به‌منظور اعمال بارهای حرارتی ناشی از جوشکاری

در گام دوم، مدل اجزای محدود با فرض وجود تنش¬های پسماند ناشی از جوشکاری ورق به قاب محیطی ساخته شد. در روش المان محدود دو رویکرد مشخص و مجزا برای انجام تحلیل‌های ترمودینامیکی و مدل‌سازی فرآیند جوشکاری وجود دارد:

۱- روش مستقیم (هم‌بند)

۲- روش غیرمستقیم (غیرهم‌بند)

روش مستقیم فقط شامل یک تحلیل می‌باشد و درآن از المان‌هایی استفاده می‌شود که دارای درجات آزادی حرارتی و مکانیکی لازم هستند و در این نوع مدل‌سازی نیاز به دو تحلیل مجزای حرارتی و مکانیکی نیست، بلکه هم‌زمان هر دو تحلیل با هم انجام می‌شوند.

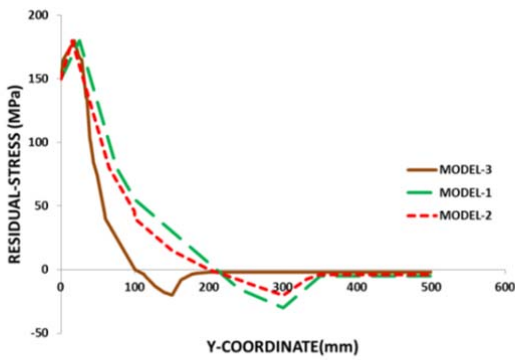
در روش غیرمستقیم تحلیل در دو مرحله انجام می‌گیرد. در این روش ابتدا تحلیل حرارتی انجام می-شود و سپس تغییرات حرارتی آنالیز اول به عنوان بار اعمالی در آنالیز دوم مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر تحلیل دارای دو حوضهٔ A و B باشد، برای فرآیندهایی که حل حوضهٔ A بر روی حل حوضهٔ B بی‌تأثیر است و دو حوضهٔ مستقل از هم هستند، تحلیل غیرمستقیم مناسب است؛ زیرا این تحلیل انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به روش مستقیم دارد چرا که دو تحلیل می‌توانند به‌صورت مستقل از هم انجام شوند.

از آن‌جایی که فرآیند جوشکاری یک فرآیند حرارتی گذراست، استفاده از روش غیرهم‌بند مناسب‌تر می‌باشد.

در این مرحله فرآیند جوشکاری به‌صورت دو-بعدی و با استفاده از تکنیک غیرهم‌بند حرارتی-مکانیکی انجام گرفت. برای این منظور طی یک آنالیز حرارتی، نحوهٔ توزیع حرارت ناشی از فرآیند جوشکاری نسبت به زمان به دست آمد و سپس این تاریخچهٔ تغییرات حرارتی، به عنوان بار حرارتی در آنالیز مکانیکی مدل استفاده گردید. به‌منظور تعیین بهترین مش بندی برای انجام آنالیزها، سه نوع مش‌بندی در نظر گرفته شد و پس از بررسی توزیع تنش‌های پسماند، نسبت به انتخاب بهترین مش‌بندی اقدام گردید. تعداد، ابعاد و نوع مش‌بندی‌ها به‌صورت جدول (۳)، بر روی نمونه اعمال گردید. در مدل۳، مش‌بندی حول خط جوش بسیار ریز صورت پذیرفته و در دیگر قسمت‌ها از مش‌های با ابعاد بزرگ‌تر استفاده شده است. شکل(٤) ، میزان توزیع تنش پسماند نسبت به فاصله از محل جوشکاری را در سه مدل نشان می‌دهد.

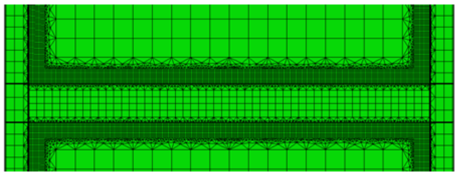
جدول ۳ مشخصات مش‌بندی‌های مدل

مدل	شکل المان	ابعاد مش	تعداد المان
۱	Structure Quad	۲۵ میلی متر	۹٦۹٦
۲	Structure Quad	۱۵ میلی متر	۲۷۳۹٦
۳	Tri & Structure Quad	٤ تا ۲۵ میلی متر	۹۷۳۵٤



شکل ۴ میزان توزیع تنش پسماند نسبت به فاصله در مدل‌های با مش-بندی سه‌گانه

با توجه به تغییرات شدید حرارتی و هم‌چنین غیرخطی شدن هندسی ورق در نواحی نزدیک به خط جوش، باید در حوالی خط جوش (مطابق مدل ۳) از مش‌های با ابعاد ریزتر استفاده شود و با دور شدن از خط جوش و به‌منظور کاهش زمان آنالیزهای حرارتی و مکانیکی از مش‌های با ابعاد بزرگ‌تر(شکل۵) استفاده گردد. براساس شکل(٤)، و با توجه به توزیع مناسب‌تر تنش¬های پسماند در مدل۳، از این مدل مش‌بندی در آنالیزها استفاده شده است. در آنالیزهای حرارتی از المان‌های DS3 و DS4 و در آنالیزهای مکانیکی از المان‌های S3 و S4 برای مش‌بندی استفاده شده است.



شکل ۵ نحوۀ مش‌بندی حوالی خط جوش و دیگر اعضای در مدل ۳

جدول ٤ مشخصات حرارتی و مکانیکی ورق برحسب دما

مشخصات مصالح	دما								
	۰	۲۰۰	٤۰۰	٦۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰	۱٤۰۰	۱٦۰۰
مدول یانگ (گیگا پاسگال)	۲۰٦۰۰۰	۱۸۰۰۰۰	۱۳۰۰۰۰	۸۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۳۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰
تنش تسلیم (مگاپاسگال)	۱۸۰	۱۵۰	۱۳۰	۸۰	۳۰	۱۲	۱۰	۱۰	۱۰
ضریب پواسون	۰/۳	۰/۳	۰/۳۲	۰/۳۳	۰/۳٤	۰/۳٦	۰/۳٦	۰/۳۸	۰/٤
ضریب انتقال حرارت	۵۸	۵۵	٤۳	۳۵	۳۲	۳۲	۳۱	۳۵	٤۸
گرمای ویژه	۳۸۰	۳۲۰	۳۰۰	۵۰۰	۱۱۰۰	٤۰۰	٤۹۰	۵٤۰	۱۱۰۰
ضریب انبساط حرارتی	۱/۱۵	۱/۲	۱/۳	۱/٤۲	۱/٤۵	۱/٤۵	۱/٤۵	۱/٤۵	۱/٤۵
چگالی	۷۸۸۰	۷۸۸۰	۷۸۰۰	۷۷٦۰	۷٦۰۰	۷۵۲۰	۷۲۹۰	۷۳۰۰	۷۲۵۰

هم‌چنین مشخصات حرارتی و مکانیکی مصالح ورق¬ها به‌صورت تابعی از دما مطابق جدول(٤)، به مدل معرفی گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دما، فولاد دچار کاهش مقاومت شده که این مسئله در تغییرات مدول الاستیسیته قابل مشاهده است.

آنالیز حرارتی. انتقال حرارت به دو شکل قابل بررسی می‌باشد :

حالت پایدار

حالت گذرا (وابسته به زمان)

مسئلۀ جوشکاری, یک فرآیند وابسته به زمان است، و لذا باید در بررسی حرارتی آن از معادلۀ انتقال حرارت در حالت گذرا استفاده نمود.

هنگامی که یک حجم به‌وسیلۀ صفحاتی در شش وجه یک المان در بر گرفته می‌شود، تعادل حرارتی با رابطۀ(۱) بیان می‌شود[6]

$$-\left(\frac{\partial R_x}{\partial x}+\frac{\partial R_y}{\partial y}+\frac{\partial R_z}{\partial z}\right)+Q(x,y,z,t)=\rho C\frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t} \qquad (۱)$$

که در این معادله R_x، R_y، R_z نرخ شار حرارتی در واحد سطح، $T(x,y,z,t)$ دمای کنونی (دما در هر لحظه)، $Q(x,y,z,t)$ نرخ تولید حرارت اولیه، ρ چگالی، C گرمای ویژه، و t زمان است

شبیه‌سازی منبع حرارتی متحرک با اعمال شار حرارتی به‌صورت سطحی و دایره‌ای شکل و به طریق کدنویسی به زبان فرترن صورت گرفته است. منبع حرارتی به‌صورت کاملاً عمود نسبت به سطح ورق در نظر گرفته شده و مقدار شار حرارتی از رابطۀ(۱) محاسبه و بر مدل اعمال گردیده است[11,12]:

$$q(r)=\frac{3Q}{\pi r_b^2}e^{-3(r/r_b)^2} \qquad (۲)$$

که در رابطهٔ فوق Q مقدار انرژی تولید شده توسط منبع تولید انرژی است و بستگی به نوع جوشکاری دارد، r فاصلهٔ مرکز منبع حرارتی تا نقطه ای است که شار حرارتی به سطح اعمال می‌شود و r_b شعاع حوضچهٔ جوش می‌باشد که مقدار آن ثابت و برابر ٥ میلی‌متر فرض شده است. مقدار Q در جوشکاری از نوع TIG از رابطهٔ(٢) به‌دست می‌آید:

$$Q = \eta VI \qquad (٣)$$

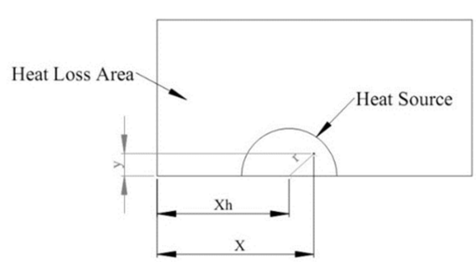
که در آن η ضریب بازدهی جوشکاری و برابر ٧٠٪ است، I شدت جریان و V مقدار ولتاژ می‌باشد[4]. مقدار r در رابطهٔ (١) از رابطهٔ (٣) به‌دست می‌آید :

$$r = \sqrt{(x - x_h)^2 + y^2} \qquad (٤)$$

که در آن X، Xh و y در شکل (٦) [11] نشان داده شده و Xh از رابطهٔ(٤) به‌دست می‌آید :

$$x_h = (t - t_0)V \qquad (٥)$$

که در آن t0 ، مدت زمانی است که مرکز منبع حرارتی به اولین گره در راستای محور جوشکاری می-رسد و با افزایش زمان جوشکاری t مقدار Xh افزایش می‌یابد و باعث حرکت منبع حرارتی می¬گردد. چنان¬چه مقدار r کمتر یا مساوی با مقدار rb باشد مقدار شار حرارتی از رابطهٔ(١) ، اعمال می‌شود و در غیر این‌صورت مقدار آن صفر است.



شکل ٦ : محدوده حوضچه جوش و ناحیه خارج از حوضچه جوش

آنالیز مکانیکی. تحلیل مکانیکی فرآیند جوشکاری نسبت به تحلیل حرارتی از متغیرها و درجهٔ غیرخطی بالاتری برخوردار است. در تحلیل مکانیکی، تاریخچهٔ دمایی به‌دست آمده از تحلیل حرارتی، به‌عنوان بارگذاری حرارتی به معادلات تحلیلی مکانیکی وارد می‌شود. تنش و کرنش حرارتی در هر مرحلهٔ زمانی محاسبه می‌گردد و حالت نهایی تنش پسماند با انباشته شدن تنش¬ها و کرنش‌های حرارتی ایجاد می‌شود. این کار به این صورت انجام می‌شود که در طول هر مرحلهٔ زمانی، با اعمال توزیع حرارت به‌دست آمده از تحلیل حرارتی، تنش¬های حرارتی محاسبه می‌شوند. این تنش¬ها به مقادیر محاسبه شده در مراحل قبل اضافه می‌شوند تا رفتار مکانیکی فرآیند جوشکاری را مرحله به مرحله شبیه‌سازی کنند. این رفتار وابسته به خواص مواد در دماهای مختلف می‌باشد[11].

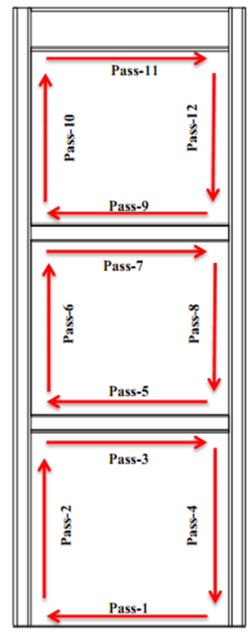
رابطهٔ (٦) [8]معادلات اصلی مربوط به تحلیل مکانیکی شامل معادلات تعادل و معادلات پایه‌ای می-شود.

$$\sigma_{ij} + \rho b_i = 0 \qquad (٦)$$

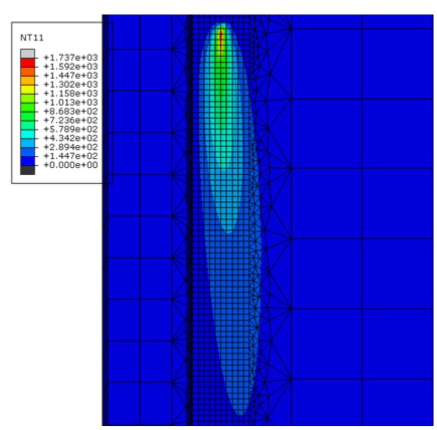
که σ_{ij} تنسور تنش و b_i نیروی حجمی است. معادلهٔ دوم نشان‌دهندهٔ متقارن بودن تانسور تنش است. شرایط مرزی، شامل اتلاف انرژی حرارتی به‌صورت تشعشع با هوای اطراف است. دمای اولیه برابر دمای محیط یعنی ٢٠ درجهٔ سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است.

آنالیز حرارتی و مکانیکی مدل آنالیز حرارتی شامل دو مرحله است که مرحلهٔ اول مرحلهٔ جوشکاری و نحوهٔ گرم شدن و مرحلهٔ دوم شامل سرد شدن نمونه تا رسیدن به دمای محیط را شبیه‌سازی می‌کند. به‌منظور اتصال هر ورق به قاب پیرامونی، ٤ خط جوش لازم است و با توجه به وجود سه ورق، در مجموع ١٢ پاس جوش وجود دارد و با در نظر گرفتن دو مرحله در هر پاس جوش، در نتیجه کل آنالیز حرارتی شامل ٢٤ مرحله است (شکل ٧). با مدل‌سازی نحوهٔ اعمال شار حرارتی ناشی از جوشکاری، پاس‌های جوشکاری بر

روی مدل اعمال گردید. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، توزیع حرارت هنگام جوشکاری به‌صورت دوایر متحدالمرکز است که با دورشدن از مرکز جوش، دما کاهش می‌یابد و میزان آن در محل جوش برابر ۱۷۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد می باشد.

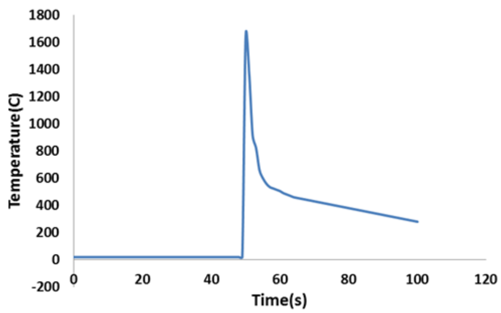


شکل ۷ نحوهٔ جوشکاری ورق¬ها به قاب پیرامونی



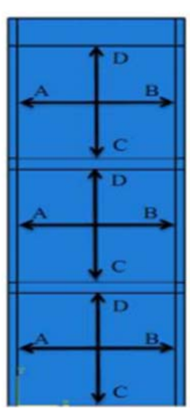
شکل ۸ نحوه توزیع حرارت در هنگام جوشکاری

با توجه به فرض سرعت حرکت الکترود بر روی ورق برابر ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه و با توجه به طول هر خط جوش برابر ۱۰۰۰ میلی‌متر، زمان مورد نیاز برای هر پاس جوش ۱۰۰ ثانیه می باشد. شکل (۹)، نمودار تغییرات دمایی وسط خط جوش نسبت به زمان از آغاز تا پایان فرآیند جوشکاری را نشان می‌دهد.

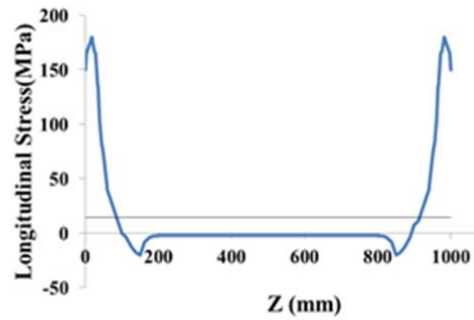


شکل ۹ تغییرات دما از آغاز تا پایان جوشکاری مرکز خط جوش

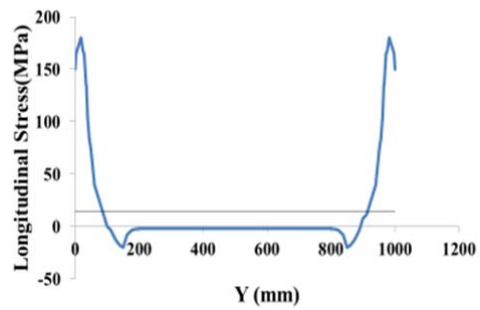
پس از اتمام فرآیند جوشکاری تمام ورق‌ها به قاب پیرامونی، تنش‌های پسماند در ورق ایجاد می‌شود که به‌منظور نمایش میزان آنها مقاطع عمود بر خط جوش مطابق شکل (۱۰)، ترسیم شده و در شکل(۱۱)، نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنش¬ها در نزدیکی خط جوش به‌صورت کششی و با دور شدن از آن کاهش می‌یابد و تبدیل به تنش فشاری می‌شود. حداکثر تنش کششی در بر خط جوش رخ داده و در آنجا ورق به حد تنش تسلیم خود رسیده است.



شکل ۱۰ مقاطع عمود بر خطوط جوش



(الف) مقطع AB

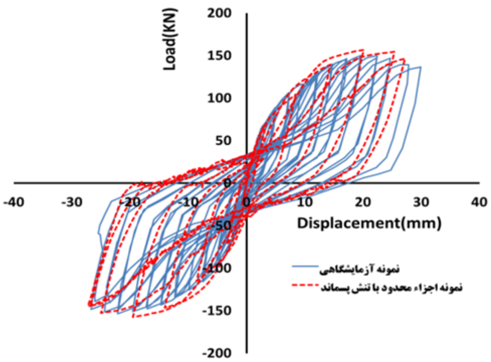


(ب) مقطع CD

شکل ۱۱ میزان تنش پسماند ورق‌ها در امتداد عمود بر خط جوش

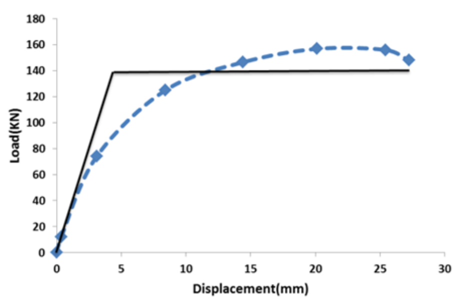
آنالیز مکانیکی مدل دارای تنش پسماند

تنش های پسماند به‌دست آمده در مراحل قبل به‌صورت شرایط پیش فرض قبل از آنالیز بر مدل وارد شد و نمونۀ دارای تنش پسماند تحت بارگذاری جانبی چرخه‌ای مطابق دستورالعمل ATC-24 مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور مقایسۀ رفتار مکانیکی مدل دارای تنش پسماند با رفتار آزمایشگاهی آن، در شکل(۱۲)، منحنی چرخه‌ای بار–تغییرمکان طبقۀ اول مدل‌ها ترسیم گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق بین نتایج آزمایشگاهی و اجزای محدود با اعمال تنش پسماند به‌مراتب بیشتر از تطابق بین نتایج آزمایشگاهی و اجزای محدود بدون اعمال تنش پسماند شکل (۱۲)، است.



شکل ۱۲ مقایسۀ رفتار هیسترزیس طبقۀ اول مدل اجزای محدود دارای تنش پسماند و مدل آزمایشگاهی

به‌منظور محاسبۀ پارامترهای رفتاری نمونۀ دارای تنش پسماند، منحنی پوش و منحنی دو خطی ایده‌آل طبقۀ اول در شکل(۱۳) ترسیم گردیده است.



شکل ۱۳ منحنی پوش و دو خطی طبقه اول نمونه دارای تنش پسماند

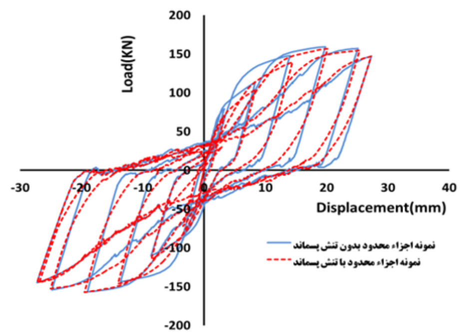
بر اساس شکل (۱۳)، میزان پارامترهای رفتاری نمونه دارای تنش پسماند مطابق جدول (٦)، می باشد.

جدول ٦ پارامترهای رفتاری نمونه اجزای محدود با تنش پسماند

پارامتر	مقدار
سختی	۳۱/۵ KN/m
مقاومت تسلیم	۱٤۱ KN
مقاومت نهایی	۱٥٦ KN
شکل پذیری	٦/۰۵
جذب انرژی	۱۸/۰٦ KN/m

مقایسهٔ پارامترهای رفتاری مدل اجزای محدود در دو حالت اعمال و عدم اعمال تنش¬های پسماند

به منظور مقایسه رفتار مدل در دو حالت اعمال و عدم اعمال تنش¬های پسماند ناشی از جوشکاری، در شکل(۱٤) نمودار چرخه‌ای بار-تغییرمکان طبقهٔ اول مدل در دو حالت نشان داده شده است.



شکل ۱۴ مقایسه رفتار هیسترزیس مدل در دو حالت اعمال و عدم اعمال تنش¬های پسماند

با مقایسه مقادیر پارامترهای رفتاری نمونه در دو حالت اعمال و عدم اعمال تنش های پسماند ناشی از جوشکاری که در جداول ۲و٦ خلاصه شده، مشاهده می شود که در نظر گرفتن تنش¬های پسماند ناشی از جوشکاری ورق به اعضاء محیطی باعث کاهش ۷/۱ درصدی میزان سختی، کاهش ۱/٤ درصدی میزان مقاومت تسلیم، کاهش ۱/۲٦ درصدی میزان مقاومت نهایی، کاهش ۷/٦ درصدی میزان شکل پذیری و کاهش ۳/٤ درصدی میزان جذب انرژی نسبت به مقادیر این پارامترها در مدل بدون اعمال تنش پسماند می باشد. اگرچه تأثیر اعمال تنش پسماند بر پارامترهای رفتاری دیوار برشی فولادی نظیر مقاومت تسلیم، مقاومت نهایی و جذب انرژی اندک است، اما تأثیر قابل اعتنایی بر میزان سختی و شکل پذیری دیوار برشی فولادی داشته است.

مراجع

1. Sabouri-Ghomi, S., Roberts, T.M., "Nonlinear Dynamic Analysis of Steel Plate Shear Walls Including Shear and Bending Deformations", *Engineering Structures*, vol. 14, No.5, pp. 309-317, (1992).

2. Caccese, V. , Elgaaly, M., "Experimental Study of Thin Steel-Plate Shear Walls Under Cyclic Load", *J. of Str. Engrg., ASCE*, vol. 119, No. 2, pp. 573-587, (1993).

۳. صبوری، سعید، قلهکی، مجید،],«مطالعهٔ آزمایشگاهی دو نمونه دیوار برشی شکل‌پذیر»، نشریهٔ علمی-پژوهشی امیرکبیر/ سال نوزدهم، شمارهٔ ج-٦٨،(مهندسی عمران)، (بهار و تابستان ۱۳۸۷).

4. Masubuchi.k, *"Analysis of Welded Structures, Residualstresses Distortion, and their Consequences*", New York, Pergamon Press, (1980).

5. Yajiang,L., Jun,W., Maoai,C and Xiaoqin, S. " Finite Element Analysis of Residual Stress in Weld Zone of High Strength Steel",. *Bull mater Sci*, Vol.27, No.2, pp.127-132, (2004).

6. chang, P,H., Teng, T.," Numerical and Experimental Investigations on the Residual Stresses of the Butt-Welded Joints",. *computional Materials Science*, Vol.29, pp.511-522, (2004).

7. Syngellakis, S., Mellor, B., "Finite Element Analysis of Residual Stresses in Butt Weld", Computational Engineering & Design Group, School of Engineering Sciences, University of Southampton, Highfield, Southampton. SO17 1BJ, (1999).

8. D D, Hidekazu Murakawa, "Prediction of Welding Distortion and Residual Stress in a Thin Plate Butt-

Welded Joint",. *Computational Materials Science*, vol. 43, pp. 353–365, (2008).

9. ATC Guidelines for Seismic Testing of Components of Steel Structures, Applied Technology Council, Report 24,. (1992).

۱۰.قلهکی، مجید، «بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی شکل‌پذیر با ورق نازک و اثر نوع اتصال تیـر بـه سـتون در آنها»، رسالهٔ دکتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ،(١٣٨٦).

11. Krutz,L, G.w., J,Segerlind, "Finite Element Analysis of Welded Structures",. *Welding Journal*, vol. 57, pp. 211-216, (1987)

12. Friedman, E. "Thermo-mechanical Analysis of Welding Process Using the Finite Element Method",. *Jornal pf pressure vessel Technology,* Trans. ASME, vol. 97, pp. 206-213, (1975).

۱۳. معین، هادی ،«تحلیل المان محدود تنش پسماند در یک اتصال جوشی از جنس آلومینویم استحکام بالا"، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۸۹).